**вступление**

В начале 70х годов был впервые введен термин nowcasting (Browning, 1980). Данный термин подразумевает прогнозирование штормовых явлений до нескольких часов вперед. Введение данного термина в метеорологии связано в первую очередь с быстро меняющимся поведением конвективных систем, которые и приводят к штормовым явлениям, а в последствие и к разрушениям на Земле.

В настоящее время термин nowcasting включает в себя достаточно широкий спектр методов предсказания погоды с использованием радарных, спутниковых данных и данных с системы регистрации грозовых разрядов (LIGHTNING DETECTION NETWORK). Задача прогнозирования грозовых разрядов нетривиальная задача в современной метеорологии, которая усложняется отсутствием полноценных математических моделей описывающих формирование грозовых разрядов в атмосфере Земли.

Несмотря на короткое время прогноза, в nowcasting происходит автоматическая обработка и анализ больших метеорологических данных за достаточно короткое время, что влечет за собой применение быстрых алгоритмов обработки данных и новых математических методов, таких как методы машинного обучения. В нашей статье мы не будем подробно на этом останавливаться на этом вопросе.

В нашей статье мы представляем оригинальный метод идентификации грозовых явлений по временному набору текстурно-геометрических признаков изображений радиолокационных полей отражаемости с использованием дополнительных данных системы регистрации грозовых разрядов. В своей работе мы используем данные с доплеровских радаров WSR-88D и lightning detection network (vaisala). В первой главе мы приводим обзор существующих автоматических способов предсказания грозовых вспышек. Во второй главе мы приводим основные положения нашего оригинального метода и показываем математические аспекты нашей работы. В третьей главе мы приводим результаты нашей работы, основанные на фактических данных за один день. В последней главе мы обсуждаем полученные результаты.

**глава 1.**

Во многих странах разрабатываются современные прогностические методы прогнозирования возможного движения грозовых конвективных ячеек и их эволюцией на основе наблюдений за изменением конвективной ячейки и современного математического аппарата. Основная сложность в наблюдение за конвективными системами заключается в том, что они состоят из конвективных ячеек, которые имеют достаточно короткое время жизни от нескольких минут до 30 минут. Стоит заметить, что не все ячейки проходят полный жизненный цикл. В зависимости от внешних условий в атмосфере, они могут разваливаться или сливаться с более мощными ячейками. Данный факт затрудняет анализ движения конвективных систем [1].

Если структурно рассматривать современные автоматические системы прогнозирования опасных штормовых явлений по радиолокационным данным, то можно увидеть, что состоят они из совокупности алгоритмов - идентификация конвективной ячейки, слежение за ее состоянием и положением и анализом опасности конвективной ячейки: штормовой ветер, торнадо, град, ливневый дождь и т.д. Примером законченной прогностической системы является система TITAN (Thunderstorm Identification Tracking Analysis and Nowcasting) [1],[2], которая работает по данным доплеровского метерадиолокатора. Суть алгоритмов, которые входят в TITAN заключается в определение центров конвективных ячеек с тремя разными порогами отражаемости (35, 40 и 45 dBZ) и по данным доплеровской скорости с помощью метода комбинаторной оптимизации прогнозируют их дальнейшее движение. Далее по развитию каждой конвективной ячейки или по совокупности оценивают их опасность. Оценка опасности конвективной ячейки может происходить автоматически, либо контролироваться оператором с использованием дополнительных аэрологических или спутниковых данных. Данный алгоритм дает ошибки в прогнозировании опасных явлений и не может распознавать грозовые ячейки. В 1998 году (Johnson) был разработан алгоритм SCITS (Storm Cell Identification and Tracking). Главное отличие алгоритма SCITS заключается в том, что идентификация конвективных ячеек проводится по семи различным границам отражаемости [3]. Далее предсказывается сектор возможного положения выбранной конвективной ячейки в последующий момент времени по данным доплеровской скорости. Полученные данные сравниваются с текущими положениями ячеек в данный момент времени. Если положение конвективной ячейки в текущий момент времени попадает в предсказанную окрестность, то положение конвективной ячейки в предыдущий момент времени будет считаться предиктом для настоящего момента времени. Опасность конвективной ячейки предсказывается из рассчитанного значения вертикальной водности ячеек. Алгоритм SCITS позволяет идентифицировать грозовые конвективные ячейки, но не может контролировать слияние конвективных ячеек или их распад на мелкие ячейки. Данный факт вносит большую ошибку в прогнозировании штормовых явлений. Для исключения ошибок прогнозирования в 2002 году был разработан алгоритм TRACE3D (Handwerker) [4]. По сути, этот алгоритм схож с алгоритмом SCITS, но между ними существует разница, которая позволяет отследить слияние распад конвективных ячеек. Идентификация конвективных ячеек в TRACE3D проводится в два этапа. На первом этапе идентифицируются все ячейки значения отражаемости, которых больше или равно 35 dBZ. Затем идентифицируются ячейки по порогам отражаемости с шагом 10 dBZ по умолчанию. Слежение за последующим движением проводится также как и в алгоритме SCITS - проводится предсказания положения в определенном секторе выбранной конвективной ячейки и сравнение с реальным положением в настоящий момент времени. На этом же шаге проверяется вероятность раскола или слияния ячеек. Если несколько ячеек попадают в предсказанный сектор, то проводится расчет фактора слияние или распада ячейки. Расчет фактора слияния или распада рассчитывается соотношений размеров ячеек в предыдущий момент времени. Далее оценивается положение выбранной ячейки и на основании данных по предыдущему ее положению определяется радиус ее поиска. На следующем этапе проводится кросс слежение за двумя ячейками, для исключения возможности перерождения конвективных ячеек. Оценка опасности конвективных ячеек проводится из рассчитанного значения вертикальной водности всего объема ячеек.

В прогностической системе SIGNOOS алгоритмы идентификации и слежения за конвективными системами разделены на 2 независимых «продукта». Идентификацию проводит алгоритм CONO. Его метод заключается в том, что определяется значения отражаемости в каждой области и проводится сравнение с минимальными и максимальными значениями отражаемости. Из полученных данных определяют местоположение каждой конвективной ячейки. На следующем этапе проводится деление ячеек с различными значениями интенсивности отражаемости, т.е. находится ячейка с максимальным значением отражаемости и находится ее минимальный порог отражаемости. По найденному минимальному порогу отражаемости, находится разница между минимальными и максимальными значениями отражаемости для каждой ячейки. Ячейки значения отражаемости, которых лежат ниже определенной минимальной границе в дальнейшем не рассматриваются. В таблицу записываются полученные значения, которые в дальнейшем будут являться правилам сравнения последующих ячеек. Стоит заметить, что установка максимальных и минимальных границ отражаемости проводится пользователем. Цель алгоритма CONO tracking сравнивать положение найденных ячеек на первоначальном радиолокационном изображении с последующими четырьмя изображениями. Использование метода кросс корреляции позволяет слияние или распад конвективных ячеек. Разделение алгоритмов позволяет оператору контролировать процесс работы алгоритма и по необходимости вмешиваться в его работу. Прогнозирование грозовых разрядов является отдельным продуктам в системе SIGNOOS[5], Например, TREC и COTREC [6]. Основная идея этих алгоритмов заключается в том, что в выделенной области рассчитывается вектор поля скоростей v(u, v), прогнозирования движения проводится путем минимизации выражения ,

который работает на основе данных системы регистрации гроз.

Описанные выше алгоритмы опираются на идентификации и отслеживании конвективных ячеек, существуют алгоритмы прогнозирования, в которых производится анализ движения в большой выделенной области.

Другой алгоритм VET (Variational Echo Tracking), в основу которого входит метод полулагранживой экстрополяции поля скоростей.

Описанные алгоритмы идентификации и слежения за конвективными ячейками являются базовыми алгоритмами для остальных систем. Разрабатываемых в настоящее время для прогнозирования штормовых явлений, в том числе и гроз.

Стоит заметить, что для прогнозирования гроз используют комбинированные методы. Они включают в себя использование радиолокационных данных и данных с систем регистрации гроз или спутников, которые сопрягаются с программным обеспечением радара. Примером гибридного метода прогнозирования гроз можно привести метод ec-TRAM (tracking and monitoring of electrically charged cells), разработанной совместно с учеными Германии и Австрии. Суть данного метода заключается в идентификации конвективных ячеек по порогам отражаемости и выделение границ обнаруженных конвективных ячеек. По данным систем регистрации гроз происходит обнаружение областей с повышенной электрической активностью и проводится кластеризация областей с повышенными значениями электрического поля. Затем на карте электрической активности рассчитывается вектор поля смещения. Производится наложение радиолокационных и грозовых карт. Данная процедура позволяет идентифицировать грозовые ячейки. Далее, по вычисленным векторам поля смещения прогнозируется возможное направление распространение грозовых ячеек [7].

Глава2 теоретическая часть

Различные научные группы пытались выявить признаки грозовых ячеек таких как: собственная ось вращения, изрезанность ячеек, значения водности перед грозовым разрядом, фрактальная размерность грозовых ячеек и т.д.[8,9,10,11]. В своей работе мы попытались объединить признаки грозовых ячеек, используя временной набор текстурно-геометрические признаки радиолокационных полей отражаемости. Мы использовали радиолокационные данные с доплеровского радара WSR-88D и lightning detection network (vaisala)[12,13,14]. Полученные данные представляют собой серию радиолокационных данных за каждые 5 минут. Данные с lightning detection network представляют собой список количества вспышек, время и их координаты.

Мы провели визуализацию радиолокационных данных и кластеризацию объектов по порогу отражаемости со значением отражаемости более 40 dBz. Объекты представляют собой единичные конвективные ячейки, а также их совокупность на каждом радиолокационном изображении. Далее мы собираем геометрические признаки выделенных объектов такие как: координаты центра масс, площадь, периметр, оси вращения. Далее мы создали интегральное изображение конвективных ячеек, которое представляет собой сложение радиолокационных изображений по высоте. На интегральное изображение мы наложили карту грозовых вспышек. Из полученных данных, мы создаем карту вероятности для каждого радиолокационного кадра.

A

B

С

b

Рис.1 Схема формирования карты вероятности

Из карты вероятности мы получаем вектор признаков

литература:

1. о структуре конвективных систем
2. Meyer V., Thunderstorm tracking and monitoring on the basis of three-dimensional lightning data and conventional and polarimetric radar data, Ludwig-Maximilians-Universitat, 2010, pp.129.
3. Dixon, M., and G. Weiner,: TITAN: Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis and Nowcasting – A radar based methodology. *J.Atmos.Oceanic Technol., 10*, 1993, p. 785-797.
4. Mark M. Wheeler. WSR-88D Cell Trends Final Report. NASA Contractor Report CR-207904, 1998, pp.143.
5. Johnson J.T., MacKeen P. L.,Witt A., DeWayne M. E.,. Stumpf G. J., Eilts M. D., and Thomas K. W.: The Storm Cell Identification and Tracking Algorithm: An Enhanced WSR-88D Algorithm. An Enhanced WSR-88D Algorithm.*Weather and Forecasting Vol. 13*, 1998, pp. 263-276*.*
6. Broveli P., Senesi S., Arbogast E., Cau Ph., Cazabat S., Bouzom M., Reynaud J. Nowcasting Thunderstorms with SIGnificant weather Object Oriented Nowcasting Systwems. Meteo-France,WSNO5-Touluse France, 5-9 september 2005, pp.229-235
7. Reyniers M. Quantitative precipitation forecasts based on radar observations:principles, algorithms and operational systems.Royal Meteorological Institute of Belgium,52,2008, p. 62.
8. Т
9. Т
10. Т
11. т
12. <https://www.ncdc.noaa.gov/nexradinv/>
13. <https://www.ncdc.noaa.gov/swdi/#TileSearch>
14. <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/radar-data/radar-map-tool>